第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

塔里木河下游河道断流区生态安全评估与生态恢复对策

孔子洁[1,2]， 邓铭江[3]， 凌红波[4]， 王光焰[5]， 徐生武[5]， 王增如[6]

（1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院，天津 300350; 3. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局，新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 新疆塔里木河流域干流管理局，新疆 库尔勒 841000; 6. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：治理塔里木河下游断流河道的生态环境对维护下游整体的生态安全以及巩固近20 a的生态输水成果具有重要意义。塔里木河下游自2000年开始实施生态输水，现今已取得明显成效；但流域内的局部区域生态退化形势严峻，其支流喀然其河和纳胂河河道依然支离破碎。利用河道断流区域遥感影像和气象水文等数据，结合GIS技术和Mann-Kendall非参数检验方法，分析了生态环境要素时空变化规律，评估了其生态安全状况，提出了生态恢复对策。结果表明：(1) 气象要素方面，1971—2019年在大风日数极显著减少的情况下，沙尘暴日数仍有所增加；1957—2019年气温和降水量均呈上升趋势，2000—2018年温度植被干旱指数显著增大。(2) 植被要素方面，2000—2018年植被覆盖度和生产力均呈不显著增加趋势，但其水平均很低；河道断流区生态安全处于预警和中度预警水平。

关键词：塔里木河下游；河道断流区；生态安全；生态恢复；水系连通

塔里木河地处新疆，是中国最长的内陆河，战略与生态地位十分重要。塔里木河下游地处“丝绸之路”南道要塞，是新疆连接内地第二条战略大通道必经之地，由胡杨林主体构成的绿色长廊阻挡了塔克拉玛干与库鲁克两大沙漠合拢[1]。然而，受气候及人类活动影响，20世纪50年代以来，尤其是1972年大西海子水库修建后，塔里木河下游350 km河道断流，尾闾罗布泊及台特玛湖相继干涸，胡杨林面积日趋萎缩[2-4]。为改善下游濒临崩溃的生态系统，2000年开始实施生态输水，至2018年年均输水量4.32×10^8 m^3，实现了塔里木河综合治理规划制定的3.5×10^8 m^{3}下泄水量的目标，水流到达台特马湖并形成500多平方公里湖面。然而，目前仅大西海子水库至台特马湖河段实现生态输水，喀然其河与纳胂河仍长期处于断流状态，且生态输水可恢复的植被多集中分布于输水河道1 km范围内，生态修复面积总体有限[5]。此外，长期和大量的单河道或双河道输水致使下游地下水位显著提升，台特玛湖湖面也逐年增大[6]。地下水升高后土壤蒸发的耗水量和台特玛湖湖面增加后的湖面蒸发耗水量均明显增多，致使无效蒸发的耗水量逐步增大[5]。因此，在生态供水有限的现实条件下，优化生态调控，提高生态水利用效率，利用有限的生态水修复更大面积的植被，成为下游生态治理新的关键问题。

目前，对于塔里木河下游生态保护与修复的研究主要是关于主河道区域生态输水后植被响应及地下水恢复的研究，如李丽君等[2]通过近20 a的断面来水监测资料，从水量、水质、地下水变化、植被恢复等方面，初步分析输水对生态环境的影响；王雅梅等[7]对台特玛湖2000—2017年连续的植被数据资料研究发现，随着生态输水的进行，台特玛湖植被的生态效益逐渐显现，生物多样性明显增加；

收稿日期：2021-01-27； **修订日期：**2021-04-10
基金项目：国家重点研发计划(2017YFC0504302-01)；中国科学院“西部青年学者”项目(2019-XBQNXZ-A-001)；新疆天山青年计划(2019Q006)和中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STS-QYZD-114)共同资助
作者简介：孔子洁(1997-)，女，硕士研究生，主要从事生态水文过程研究. E-mail: 18846921135@163.com
通讯作者：凌红波. E-mail: linghongbo0929@163.com

李均力等[8]利用Landsat 8 OLI、Sentinel-2A等数据构建植被覆被数据与典型监测断面植被指数时序数据,分析2013—2018年荒漠河岸带植被时空变化特征,表明塔里木河下游植被面积呈持续的增加趋势,其中灌木面积恢复最大。这些研究的最终目的是通过分析生态输水后的水文植被响应规律,为优化下游输水策略提供参考,以便改善下游生态环境。然而,河道断流区生态持续退化的现状,以及其对生态输水区产生的或潜在的威胁却很少被关注。生态输水工程已基本遏制了塔里木河下游生态不断退化的趋势[6],但是生态系统的脆弱性还未得到根本改变[6],在此情景下,断流区域的生态环境问题逐渐凸显,生态恢复和治理的需求日益增长。研究分析下游河道断流区生态环境状况将为后续开展生态治理提供重要基础参考。

自2011年,塔里木河流域实施体制改革,通过对"四源一干"水量的统一调度,保障了向塔里木河下游的生态输水。因此,在塔里木河下游,以流域体制改革的时间为分割点(2011年前后),分析断流河道区域的生态环境变化规律并对其进行生态安全评估,进而提出合理的生态恢复对策,对推进塔里木河下游、孔雀河下游、喀然其河和纳肿河的水系连通工程,提升下游整体的生态系统服务功能,巩固和扩大塔里木河综合治理成效具有重要意义。

1 研究区概况

塔里木河下游位于新疆尉犁县和若羌县境内,为大西海子水库至台特玛湖区间河段,总长约320 km,该河段呈东南走向穿行于塔克拉玛干沙漠与库鲁克沙漠之间狭窄的冲洪积平原,地势北高南低,河道弯曲,河床受风蚀、风积作用强烈,变形严重[2]。塔里木河下游河段在尉若分水闸后分为其文阔尔河和老塔里木河两支,至阿拉干又合为一支(图1)。

孔雀河发源于博斯腾湖,从博斯腾湖西部溢出,流经库尔勒市和尉犁县,最终注入罗布泊,全长841 km。因农业发展,在流经大西海子水库之后便季节性断流[9](图1)。喀然其河是孔雀河的一条分支古河道,总长度106 km。20世纪60年代前孔雀河河水流经喀然其河和纳肿河,汇流于塔里木河,之后因大规模的水土开发,孔雀河中下游相继断流干涸。纳肿河发源于恰拉水库,至买买托呼提生态闸注入其文阔尔河,全长约244 km,是塔里木河下游除老塔里木河、其文阔尔河外的第三条输水通道。70年代后,塔里木河上游水量不断减少,纳肿河逐渐断流,两岸植被濒临死亡。

研究区地貌由冲积平原、丘陵、沙漠三种类型组成。气候受塔克拉玛干、库鲁克两大沙漠的影

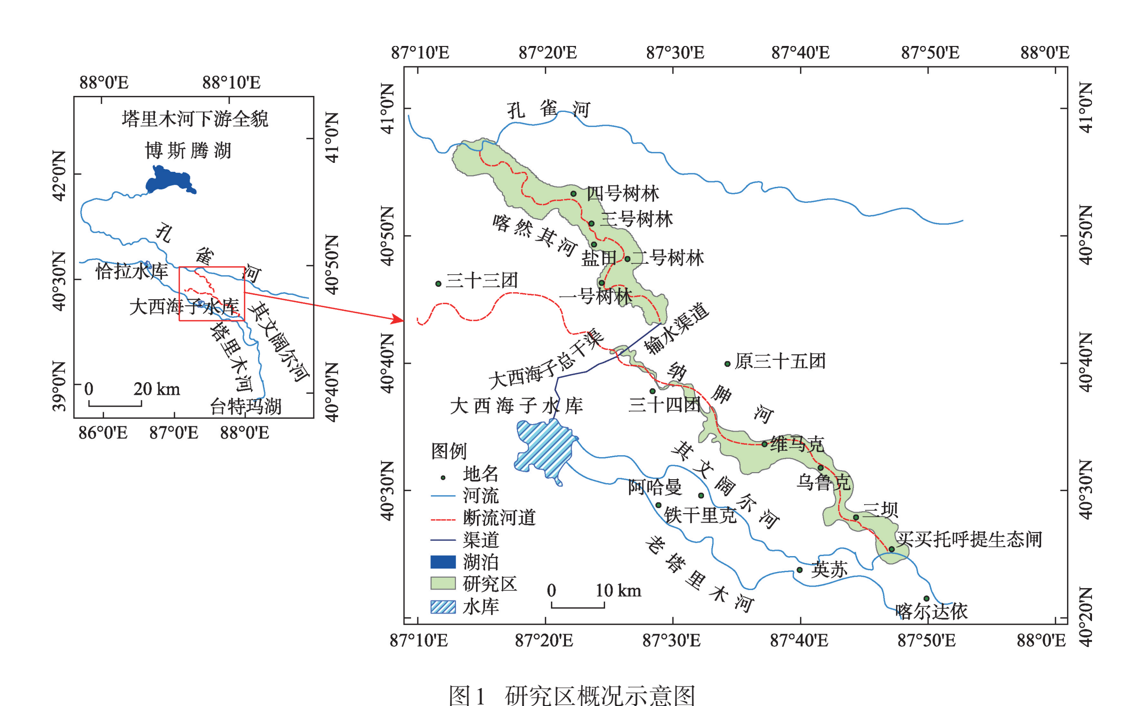


图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Overview of the study area

响，干旱少雨雪，蒸发强烈，春秋季风多，降雨量处于17.4~42.0 mm之间，而蒸发量却高达2500~3000 mm，属典型的北温带大陆性干旱荒漠气候，生态环境极为敏感和脆弱[10-11]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

遥感数据包括归一化植被指数（NDVI）、地表温度（LST）和蒸散发（ET）的时间序列数据，时间序列为2000—2018年。NDVI和LST数据分别来源于美国NASA EOS数据中心发布的MODIS MOD13Q1、MOD11A2数据集，数据时间分辨率分别为16 d和8 d，空间分辨率分别为250 m和1000 m。ET时间序列数据则来源于国家地球系统科学数据共享服务平台发布的GLASS-ET_MODIS数据集，时间分辨率为8 d，空间分辨率为1000 m。为保障数据的空间匹配，LST和ET数据被重采样为250 m。此外，对年内NDVI时间序列数据进行了最大值合成处理（MVC）来获得年尺度NDVI和月尺度NDVI，对年内LST和ET分别进行了平均计算和累计计算获得年平均LST和年累积ET。

气象要素数据包括2000—2018年全国120个站点的月太阳总辐射、1957—2019年新疆72个站点的月气温和月降水以及1971—2019年铁干里克气象站的年大风和沙尘暴日数数据，数据来源于国家气象信息中心。为获得月太阳辐射空间分布数据，借助于ArcGIS软件，对全国120个站点的月太阳总辐射数据进行空间插值。对月气温和月降水数据的空间插值则借助于Anusplin软件完成。为保障气象要素空间数据与遥感数据的空间匹配，插值过程中，像元大小均设置为250 m。

2.2 研究方法

2.2.1 指标计算 在对研究区的生态环境变化状况进行分析时，需计算植被覆盖度、温度植被干旱指数（TVDI）、植被生产力（NPP）、标准化降水蒸散指数（SPEI）、蒸散发（ET）等指标。

植被覆盖度数据基于NDVI数据，借助像元二分模型[12]计算获得。NPP数据基于太阳总辐射、气温和降水数据，利用CASA光能利用效率模型进行逐像元计算获得[13-14]。TVDI数据基于NDVI和LST数据，参考TVDI计算方法[15]，借助于IDL语言进行逐像元计算获得。SPEI数据基于月气温和月降水空间分布数据，通过逐像元计算获得[15]。ET数据为GLASS-ET_MODIS成品数据。

2.2.2 生态安全综合评价方法 研究区域生态安全水平的关键是建立合理的生态安全评价指标体系。根据研究区数据的可获取性，以代表性、相对独立性为基本原则，结合研究区降水稀少、河道断流无径流量的生态环境特征，同时基于以往研究中合并大风日数和沙尘暴日数进行分析[16-17]，本文遴选出了影响研究区生态安全的主要因素：植被覆盖度、植被生产力、蒸散发、SPEI、TVDI、大风和沙尘暴日数这6个评价指标来构建研究区生态安全指标体系。

塔里木河下游植被的生存和恢复状况是区域生态安全发展的重要标志，而植被覆盖度与植被生产力是衡量地表植被状况的重要指标[18]；蒸散发与植物种类、植物生长状况、土壤含水量及气象条件密切相关，是区域生态环境变化的重要指示[19-20]；SPEI指数包括了气温和降水的综合变化特征，用以反映研究区的气象干旱情况，属于研究区生态安全评估范畴[15]；TVDI与土壤水分密切相关，是整个区域相对干旱程度的表征指数，也是衡量植物生境条件优良与否的重要指标[15]；风沙是危及塔里木河流域生态安全的要素之一，而大风和沙尘暴天气的频次和强度变化也直接反映着绿色廊道的生态功能发展趋势[17]。

生态安全综合评价的计算采用综合评价指数（K）法进行计算，其数学表达式：$K=\sum_{j=1}^{6} r_j \times C_j$。式中：$r_j$为第$j$项指标的权重；$C_j$为第$j$项指标的评价值[21]。为确定各指标的权重，本文引入层次分析法，通过解矩阵的特征向量得到权重系数，结合研究区生态系统自身的特点，并借鉴和参考已有相关研究成果[3,17,22-25]，提出该区生态风险评价分级标准（表1）。根据生态安全标度值的判别标准，将生态安全综合评价指数从高到低划分为5个区间量度值范围：当$0 \le K < 30$时，为重度警示区；当$30 \le K < 50$时，为中度警示区；当$50 \le K < 70$时，为预警区；当$70 \le K < 90$时，为较安全区；当$90 \le K < 100$时，为安全区[26]。

3 结果与分析

3.1 气象要素变化特征

3.1.1 风沙、气温和降水量变化趋势分析 利用Mann-Kendall非参数检验来分析风沙、气温和降水量变化趋势。经计算，1971—2019年塔里木河下游

表1　指标级别划分标准（C_j）

Tab. 1　Classification standard of index level（C_j）

指标	指标级别划分标准				
	I（100分）	II（80分）	III（60分）	IV（40分）	V（20分）
大风和沙尘暴日数/d	<5	5~20	20~30	30~40	>40
TVDI	<0.4	0.4~0.6	0.6~0.75	0.75~0.9	> 0.9
植被覆盖度/%	> 20	15~20	10~15	5~10	< 5
植被生产力/（g C·m⁻²）	> 100	75~100	50~75	25~50	< 25
蒸散发/mm	>200	150~200	100~150	50~100	<50
SPEI	−0.5~0.5	−1.0~−0.5	−1.5~−1.0	−2.0~−1.5	<−2.0

平均沙尘暴天气日数为8.57 d，Mann-Kendall检验统计量Z_c为0.91，表明1971—2019年沙尘暴天气日数总体呈非显著上升趋势，年均增长为0.05 d·a^{-1}。在年际波动上，不同时段塔里木河下游沙尘暴天气日数变化差异明显（图2a），在1978年、1991年和2012年均呈现趋势的转折变化（图2b）。1971—1978年和1979—2000年2个时段沙尘暴天气日数均值分别为5.43 d和9.17 d，沙尘暴日数明显增多；2001—2012年下降至了7.08 d，较1979—2000年减少2.09 d；而在2013—2019年间，沙尘暴天气日数又增至12.29 d，明显高于其他时段。

对于大风天数，1971—2019年间塔里木河下游大风天气日数均值为8.5 d，Mann-Kendall趋势检验值为−4.32，总体呈极显著减少趋势（P<0.01），年均降低0.24 d·a^{-1}。根据图2b，塔里木河下游大风天气日数在1998年发生明显转折变化，1971—1998年时段大风天气日数均值为11.8 d，到1999—2019年时段，大风天气日数减少为4.1 d。

将大风日数变化与沙尘暴天气日数变化进行比较发现，大风天气日数极显著减小，而沙尘暴天气日数却有所增加。大风是引起沙尘暴的关键动力，而植被覆盖则是抑制沙尘暴发生的关键因素，这间接表明在断流，缺乏供水的情况下，孔雀河周围抑制沙尘暴发生的植被的覆盖水平在逐步降低，植被退化日趋严重。

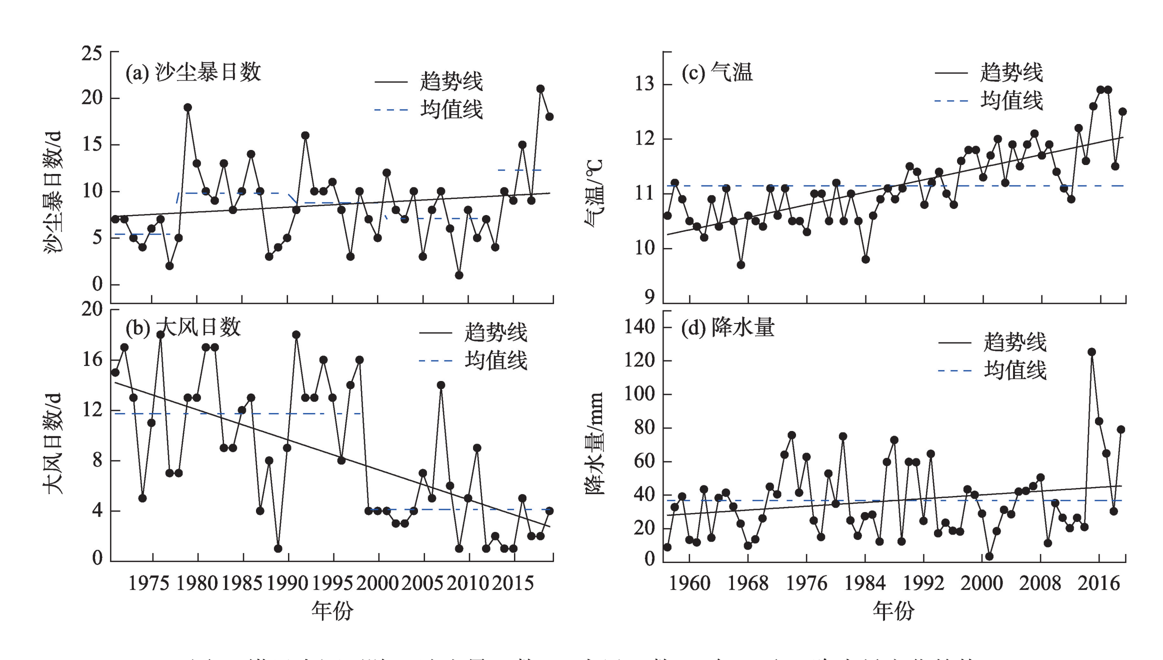


图2　塔里木河下游(a)沙尘暴日数、(b)大风日数、(c)气温及(d)降水量变化趋势

Fig. 2　Variation trend of (a) windy days, (b) sandstorm days, (c) temperature and (d) precipitation in the lower reaches of Tarim River

对于气温和降水量的变化，由图2c可知，1957—2019年塔里木河下游气温总体持续升高，Mann-Kendall趋势检验值为6.61，上升达到极显著水平（$P<0.01$），年均升温量为0.03 ℃，时段内气温平均值为11.15 ℃；由图2d可知，1957—2019年塔里木河下游降水量呈现增多的趋势，Mann-Kendall趋势检验值为1.56，增加未达到显著水平，年均增加量为0.28 mm，时段内降水量平均值为36.8 mm。

3.1.2 温度植被干旱指数（TVDI）时空变化特征 利用2018年TVDI空间分布数据分析研究区的干旱现状。本文将TVDI指数划分为<0.6、0.6~0.75、0.75~0.9及>0.9四个等级，分别表征轻旱、中旱、重旱、特旱四个干旱等级[22]。由图3a可知，2018年研究区TVDI平均值为0.90，整体处于重旱水平；空间上，研究区特旱的面积占比达到了65.1%，重旱区比例达到了24.1%，主要分布在喀然其河全段及纳肿河的维马克至买买托呼提生态闸处；中旱的面积占比为5.4%，主要分布在临近孔雀河的喀然其河起点处、人工绿洲出口至维马克段以及纳肿河尾部；轻旱区的面积占比最低，仅为5.4%，均位于34团处。

对于TVDI的时间变化，根据图3c，2000—2018年研究区TVDI总体呈增大趋势，其Mann-Kendall检验值Z_c达到了2.52，达到显著水平，研究区干旱程度越来越严重。此外，因2011年塔里木河流域开始实施四源流统一管理，为下游生态输水提供了稳定的来水条件，释放到下游的水量明显增多，因此，本文以2011年为时间节点，划分为统一管理前（2000—2010年）和统一管理后（2011—2018年）2个时段进行分析，2个时段的TVDI均呈上升趋势，年均增长分别为0.010·a^{-1}和0.008·a^{-1}；2011—2018年TVDI均维持在较高水平，该时段TVDI平均值为0.86，明显高于2000—2010年TVDI平均值0.75。空间上，与全区整体干旱化程度加剧的变化趋势一致，研究区绝大部分区域TVDI变化呈增大趋势，其面积占比达到了83.8%，呈非显著上升（$0<Z_c<1.96$）趋势的面积占比为67.6%，主要分布在喀然其河的上游河段及纳肿河的下游河段；呈下降趋势（$Z_c<0$）的面积占比仅16.2%，主要分布在二号树林、盐田地区以及34团内部河段。

3.2 植被要素时空变化特征

3.2.1 植被覆盖度时空变化特征 根据研究区植被分布特点，将植被覆盖度划分为4个等级[3,17,24]：0~

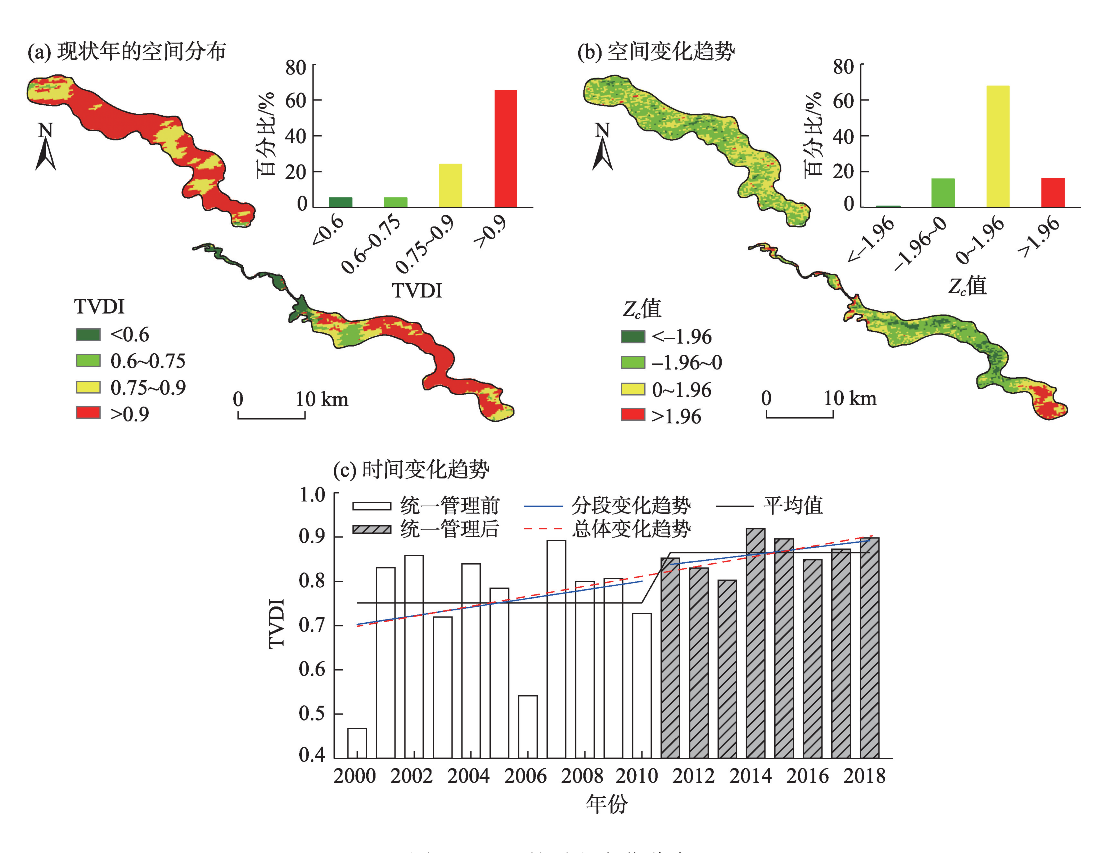


图3 TVDI的时空变化分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of TVDI

5%、5%~10%、10%~15%及>15%来分析研究区植被覆盖度空间分布。由图4a可知,研究区植被覆盖较低,2018年绝大部分区域植被覆盖度<5%,其比例达到76.5%,而全区平均植被覆盖度也仅为4.6%。覆盖度>15%的面积比例仅为4.4%,主要分布在喀然其河进入34团的尾部区域及34团内部的纳肿河河段区域,这是因为该部分河流在人工绿洲内部,农田植被种植密集且灌溉水量较大;此外,纳肿河汇入其文阔尔河的买买托呼提生态闸处,由于临近塔里木河下游生态输水区,故植被覆盖度也较高。

对于植被覆盖的时间变化,由图4c可知,2000—2018年研究区植被覆盖度总体呈增加趋势,Mann-Kendall趋势检验Z_c值为0.84,增加未达到显著水平。2000—2010年之间(统一管理前),研究区植被覆盖度均值整体变化不明显,年均增长为$0.056\cdot a^{-1}$;2011—2018年之间(统一管理后),研究区植被覆盖度呈下降趋势,年均降低$0.186\cdot a^{-1}$。两个时段研究区植被覆盖度均值分别为5.5%和6.0%,植被覆盖略有增加。

空间上,研究区植被覆盖度有所增大的面积占比为64.8%(图4b),其中呈非显著上升趋势面积占比为51.9%,主要分布在喀然其河区域;而纳肿河与其文阔尔河交汇处的植被覆盖度上升趋势显著;植被覆盖度呈下降趋势(Z_c<0)的区域主要分布在由34团流出至三坝部分的纳肿河河段,其中呈显著下降趋势的区域主要分布在维马克至三坝河段,面积比例为4.7%。

3.2.2 植被生产力时空变化特征 以2018年植被NPP空间分布为现状,并划分为0~25 g C·m^{-2}、25~50 g C·m^{-2}、50~75 g C·m^{-2}及>75 g C·m^{-2}四个等级[23],分析研究区生产力的空间分布特征。经计算2018年全区平均植被生产力为32.01 g C·m^{-2},植被生产力水平很低。空间上,植被NPP为0~25 g C·m^{-2}占比最高(图5a),为45.88%,其次为25~50 g C·m^{-2},比例为41.92%,两者占比之和达87.80%,空间上主要分布在喀然其河及纳肿河从34团流出至三坝河段;植被NPP>75 g C·m^{-2}的面积为全区最小,仅4.3%,且主要分布在人工绿洲内部。

对于NPP的时间变化,2000—2018年间,研究区植被NPP整体呈增大趋势,但变化趋势不明显,

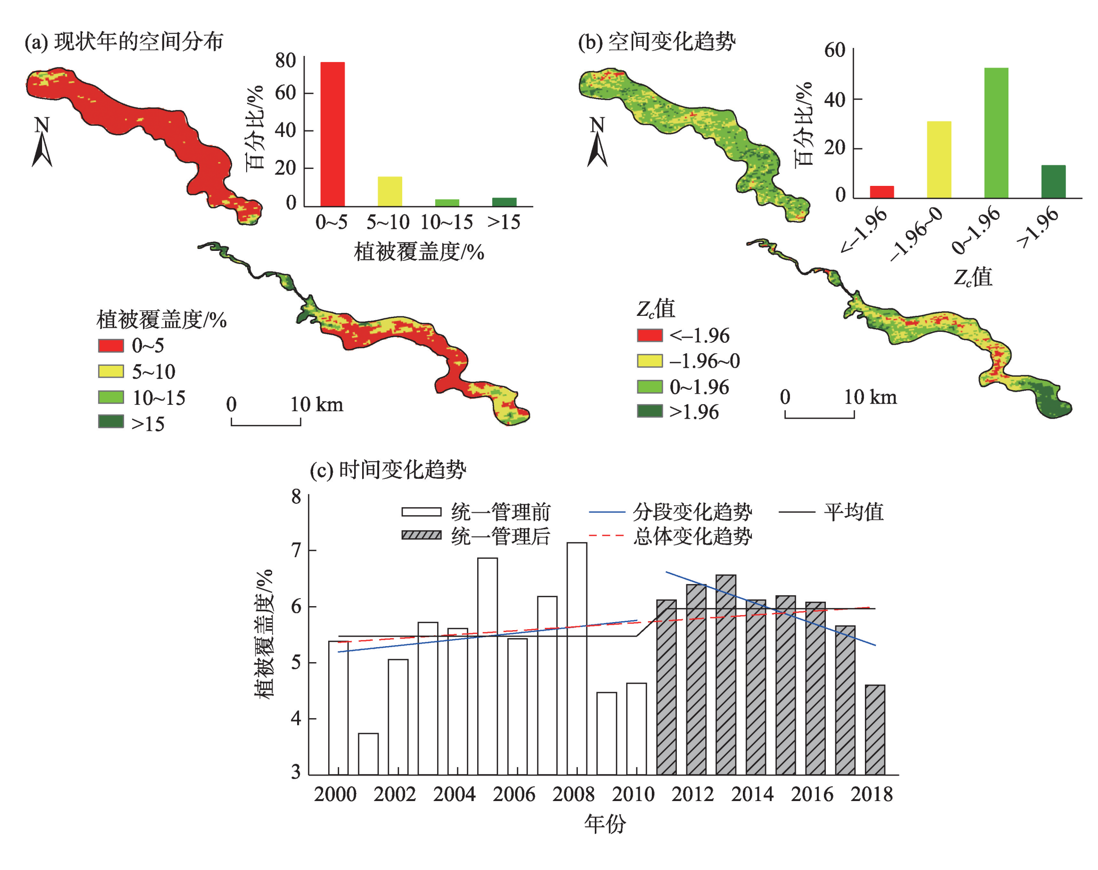


图4 植被覆盖度的时空变化分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of vegetation coverage

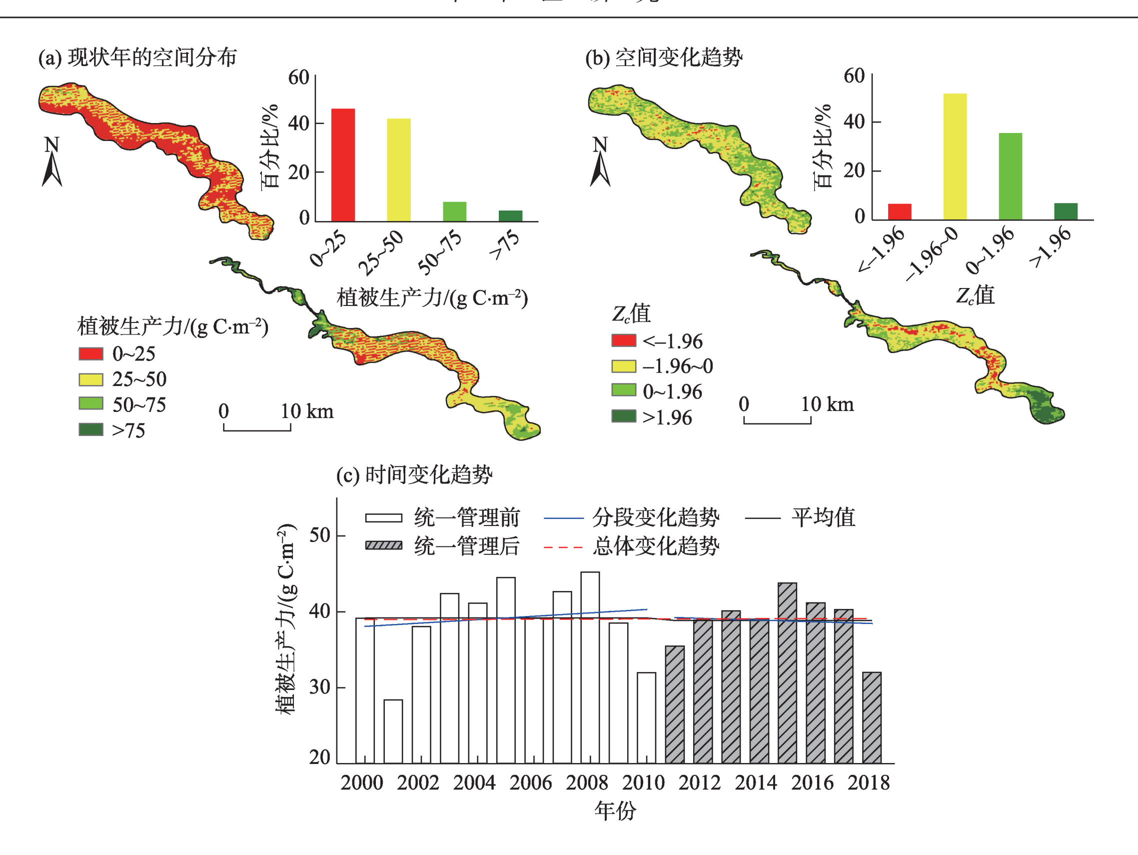


图5 植被生产力的时空变化分布

Fig. 5 Spatial and temporal distribution of vegetation productivity

年均增长仅为0.009 g C·m^{-2}·a^{-1}，Mann-Kendall趋势检验Z_c值也仅为0.21。且对比2000—2010年(统一管理前)与2011—2018年(统一管理后)2个时段，2000—2010年(统一管理前)植被NPP呈上升趋势，年均增长0.223 g C·m^{-2}·a^{-1}，而2011—2018年(统一管理后)植被NPP则呈下降趋势，年均降低0.112 g C·m^{-2}·a^{-1}；此外，尽管2000—2018年之间研究区植被NPP整体呈增大趋势，但2000—2010年到2011—2018年2个时段的平均NPP则由39.19 g C·m^{-2}·a^{-1}减小到了38.85 g C·m^{-2}·a^{-1}。

空间上，研究区57.9%的区域植被NPP发生减小，但减小达到显著水平的比例较小，为6.34%，集中分布于维马克至三坝河段。呈显著性增加趋势的面积也很少，比例为6.7%，主要分布在纳胂河与塔里木河交汇处。

3.3 塔里木河下游断流河道生态安全综合评估

由表3可知，在塔里木河下游生态安全评价指标中，植被覆盖度和TVDI比重均较大，分别为0.29和0.24；其次为ET和SPEI，比重分别为0.19和0.14，大风和沙尘暴日数以及NPP的比重仅为0.09和0.05。

表3 断流河道生态安全综合评价体系权重

Tab. 3 Weight of ecological security comprehensive evaluation system for cut-off river

指标	权重r_j	排名
植被覆盖度	0.29	1
TVDI	0.24	2
ET	0.19	3
SPEI	0.14	4
大风和沙尘暴日数	0.09	5
植被生产力	0.05	6

基于综合评价指数法，求得2001—2018年断流河道的生态安全评价指数的逐年评价值(图6)。2001—2018年研究区生态安全综合评价指数均位于预警区和中度警示区，且总体呈现下降趋势。对于2001—2010年和2011—2018年2个时段，虽然此时段内生态安全综合评价指数均出现轻微上升趋势，但该时段的平均生态安全综合评价指数也由48.86降至45.95。可见，研究区生态安全状况始终处于较差水平，且在不断恶化，河道断流缺水已经对该地区的生态安全产生了较大影响，且影响程度仍在持续加深。

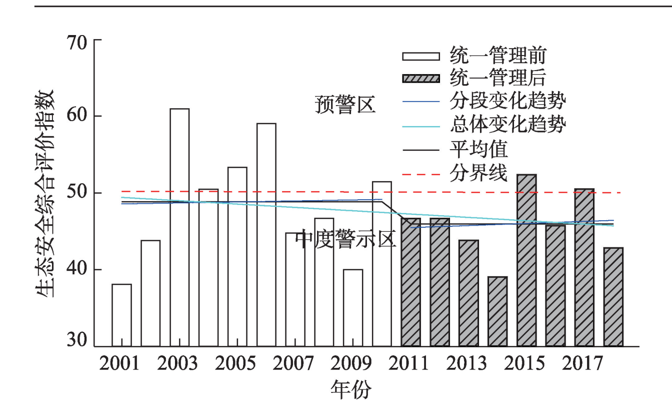


图6　生态安全综合评价逐年变化趋势

Fig. 6　Annual change trend of ecological security comprehensive evaluation

4　讨 论

4.1　塔里木河下游断流河道生态环境指标变化

综上所述,断流区气温升高,降水增多,且植被覆盖及生产力的变化也均呈增加趋势。这与前人关于我国西北干旱区气候暖湿化、植被改善的研究结果一致[27]。降水条件的改善为断流区植被生长提供了有利条件,但纳肿河上游34团处及其与其文阔尔河汇合处植被增加则主要得益于34团农耕区灌溉水和其文阔尔河的生态输水(图1、图4b和图5b)。

断流区植被覆盖及生产力虽呈增加趋势,但其干旱化程度仍然严重,且干旱化程度持续加剧。在降水增多的条件下干旱化程度却加剧,这应该是由于气温升高加剧了蒸发,致使蒸发的增多大于降水的增多[28]。这与我国西北干旱区降水增多却干旱加剧的情况一致。此外,对风沙变化分析表明,研究区在大风日数显著减少的情况下,沙尘暴日数却显著增多,沙尘危害加剧,可见断流区生态廊道的环境状况和生态功能并未因植被有所提高而改变,反而随断流时间的延长而继续恶化。

4.2　塔里木河下游断流河道与生态输水河道生态安全状况对比

2000年以来塔里木河下游河道断流区(纳肿河和喀然其河河段)TVDI不断上升,植被覆盖度与植被生产力整体均处于较低水平,生态安全问题也日趋严重;应借鉴塔里木河下游生态输水区(大西海子水库至台特玛湖河段区域)的生态输水方式进行生态治理,以提高河道断流区域的生态安全。为推进这一工作,首先对2个区域的生态安全状况进行对比,生态输水区各指标计算结果见图7。

从TVDI的总体变化趋势来看,2000—2018年生态输水区的TVDI呈下降趋势,与河道断流区的显著升高趋势相反;同时生态输水区TVDI的19 a平均值比断流区低5.9%。从分段变化趋势(2011年四

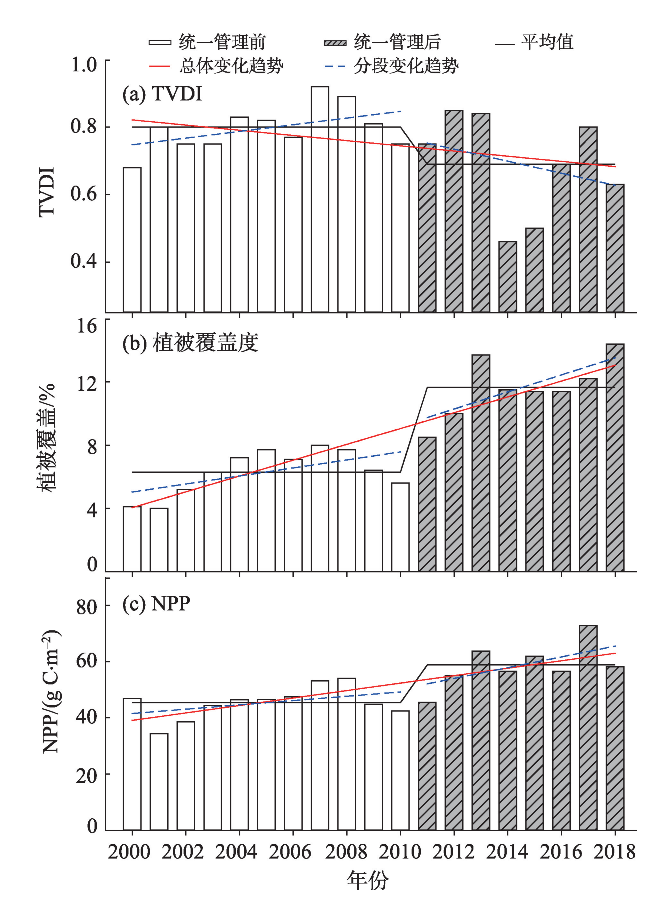


图7　2000—2018年塔里木河下游生态输水区各指标值

Fig. 7　Index values of ecological water conveyance area in the lower Tarim River from 2000 to 2018

源流统一管理前后)来看,生态输水区的TVDI均呈现下降趋势且统一管理后的下降趋势更加显著,而河道断流区的TVDI在这2个时段始终呈现上升趋势;统一管理前生态输水区的TVDI均值比河道断流区高6.3%,统一管理后生态输水区的TVDI均值比断流区低19.8%。

伴随地下水位抬升以及土壤水分条件的改善,塔里木河下游生态输水区的植被生长状况也明显改善。2000—2018年生态输水区的植被覆盖度以极显著趋势上升,而河道断流区的植被覆盖度虽呈现上升趋势但变化不显著;19 a间生态输水区的植被覆盖度均值比河道断流区高50.6%。统一管理前生态输水区植被覆盖度上升幅度大于河道断流区,

平均值也比河道断流区高15.3%;统一管理后生态输水区植被覆盖度依然呈现上升趋势而河道断流区出现大幅度下降,平均值比河道断流区高95.5%。

2000—2018年塔里木河下游生态输水区植被生产力增加趋势显著高于河道断流区,平均值比河道断流区高30.6%。从分段变化来看,统一管理前2个区域均呈现上升趋势,但生态输水区上升幅度比河道断流区大,统一管理后生态输水区持续上升而河道断流区出现轻微下降;生态输水区2时段的植被生产力均值分别比河道断流区高出15.7%和52.3%。

5 生态恢复的对策与建议

(1) 加快实施塔里木河下游水系连通工程。孔雀河在历史上与塔里木河是自然连通、可以互为补给的,具有河-河连通的自然条件[29]。此外,自2015年以来,由于开都河流域山区来水量偏丰,入博斯腾湖水量增加、水位逐年抬升;与此同时,塔里木河来水量较往年同期多,因此我们应充分利用塔里木河流域丰水年的有利趋势,充分发挥大西海子水库的生态调节功能,打通孔雀河-喀然其河-纳肿河向塔里木河干流的生态输水通道,扩大生态受水面积和生态修复范围。利用孔雀河支流喀然其河,新建人工通道,将孔雀河生态水输入纳肿河;其次利用大西海子水库总干渠及新建连通渠,将大西海子水库生态水输入纳肿河,生态水资源最终在买买托呼提生态闸注入其文阔尔河,继而流入台特玛湖。在实施过程中还需对原有淤积、堵塞较为严重的输水涵管、涵洞、交通桥等进行改建,对喀然其河、纳肿河河道进行清淤疏浚。

(2) 参考塔里木河下游生态输水的成功经验进行断流河道生态输水。自2000年向塔里木河下游生态输水以来,河道附近现存的天然植被的生长和复壮明显,但下游喀然其河、纳肿河的修复任务仍十分艰巨。如今在国家河-湖-库连通政策的有力支持以及四源流统一管理的下游稳定水源制度保障下,借鉴塔里木河下游生态修复的修复模式及成功经验,对喀然其河、纳肿河进行科学合理的生态输水,巩固塔里木河下游综合治理现状,形成由线状到面状、由单河道输水到双河道输水再到多河道输水的输水格局,是当前形势下整治下游断流区域的明智选择。塔里木河下游前期输水是一种间歇性输水——当河道有水时河水补给地下水,当停止输水时地下水位出现回落现象;这直接导致了地下水位的不稳定[30]。因此,只有坚持对喀然其河、纳肿河进行长期输水,才能保证满足天然植被的生长及生态恢复所需的地下水位。同时,在输水方式上,应通过浸淹或漫溢"面状给水"方式,有计划地逐步分段实施修建生态闸等工程措施[30];并结合断根萌蘖、激活土壤种子库等生态修复技术,实现植物的落种更新,从而增加地表覆盖、加速天然植被恢复。在输水时间上,考虑到植物种子的成熟期与生态输水时间的一致性,应使植物落种与输水时间相吻合,种子在成熟飘落后能得到充足的水分,便于种子的萌发,最终扩大向塔里木河下游输水的生态效应,实现生态系统的可持续性[30]。通过上述措施,下游区域水资源最终达到丰-枯互补、河-湖-库互济、区域空间与各河流间互调的生态输水实施效果。

(3) 加强塔里木河下游断流河道生态监测体系建设。在研究过程中发现,喀然其河、纳肿河的地下水位、植物多样性等指标历年监测数据匮乏,生态环境监测未形成一个系统的科学体系,由此导致研究区的生态安全状况进行综合评估时受到一定限制。因此,应加强对研究区的长期监测,主要包括地表水、地下水和土壤水监测,植被变化监测和生物多样性调查等,以期更加全面地对生态输水的效果进行实时评估并不断改进生态输水的方案。

6 结 论

(1) 1971—2019年塔里木河下游大风日数明显减少,但沙尘暴日数仍呈现增加趋势,两岸生态系统防护功能下降;1957—2019年塔里木河下游气温和降水量均呈上升趋势,但降水量的增多变化未达到显著水平。河道断流区现状年TVDI整体达到重旱水平,仅34团处属于轻旱水平;时间上2000—2018年及2011年前后2时段TVDI的变化均呈增大趋势,空间上83.8%区域呈现增大趋势,干旱程度加深。

(2) 2018年塔里木河下游河道断流区平均植被覆盖度仅为4.6%,76.5%区域植被覆盖度<5%,覆盖度>15%的面积占比仅为4.41%,34团附近区域植被覆盖水平总体较高。时间变化上,2000—2018年和2000—2010年植被覆盖度均呈现增加趋势,2011—

2018年植被覆盖度平均值略高于2000—2010年植被覆盖度。空间上,2000—2018年研究区64.8%区域植被覆盖度有所增大,临近下游生态输水区的纳肿河植被覆盖度上升趋势显著。

(3)研究区现状年平均植被净初级生产力为32.01 g C·m^{-2},87.80%区域植被NPP低于50 g C·m^{-2}。时间变化上,2000—2010年植被NPP出现较为明显的增大趋势,2000—2018年和2011—2018年植被生产力均变化不大。空间上来看,2000—2018年研究区57.9%区域NPP呈下降趋势,买买托呼提生态闸上游受其文阔尔河输水影响区域NPP增加趋势明显。

(4)2001—2018年研究区生态安全综合评价指数均位于预警区和中度警示区,总体呈现下降趋势;基于塔河下游河道断流区不断恶化的生态安全状况,提出了加快实施塔河下游河道断流区生态保护与修复的对策和建议。

参考文献(References):

[1] 杨鹏年, 邓铭江, 李霞, 等. 塔里木河下游间歇输水下地下水响应宽度——以塔里木河下游英苏断面为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 331-335. [Yang Pengnian, Deng Mingjiang, Li Xia, et al. Respond width of groundwater level after conveying stream water to the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang: A case study along the Yengisu section in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 331-335.]

[2] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqin, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247.]

[3] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等. 间歇性输水影响下的2001—2011年塔里木河下游生态环境变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1251-1262. [Huang Yue, Bao Anming, Wang Shifei, et al. Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transport[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1251-1262.]

[4] Chen Y, Li W, Xu C, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 547-558.

[5] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 717-726. [Deng Mingjiang, Yang Pengnian, Zhou Haiying, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 717-726.]

[6] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 864-876. [Deng Mingjiang, Zhou Haiying, Xu Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2016, 46(8): 864-876.]

[7] 王雅梅, 张青青, 徐海量, 等. 生态输水前后台特玛湖植物多样性变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1186-1193. [Wang Yamei, Zhang Qingqing, Xu Hailiang, et al. Change of plant diversity in the Taitema Lake area before and after implementing the ecological water conveyance[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1186-1193.]

[8] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985-992. [Li Junli, Xiao Hao, Shen Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013-2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985-992.]

[9] 刘亚琦, 刘加珍, 陈永金, 等. 孔雀河下游断流河道的环境特征及物种间关系[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2706-2718. [Liu Yaqi, Liu Jiazhen, Chen Yongjin, et al. Environmental characteristics and interspecific associations in the lower reaches of the Kongque River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2706-2718.]

[10] 阿布都热合曼·哈力克. 塔里木河流域生态安全及其评价研究[J]. 水文, 2011, 31(5): 42-46. [Abdul Rahman Harik. Research on ecological security and evaluation of Tarim River Basin[J]. Hydrology, 2011, 31(5): 42-46.]

[11] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 塔里木河下游生态环境变化时序监测与对比分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(3): 437-444. [Zhu Changming, Li Junli, Shen Zhanfeng, et al. Time series monitoring and comparative analysis on eco-environment change in the lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(3): 437-444.]

[12] 吴加敏, 蔡创创, 孙灏, 等. 宁夏沿黄城市带植被覆盖时空演变及其驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 696-705. [Wu Jiamin, Cai Chuangchuang, Sun Hao, et al. Spatiotemporal evolution and driving force analysis of fractional vegetation coverage over the urban belt along the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 696-705.]

[13] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被NPP的影响[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2014. [Mao Dehua. Quantitative Assessment in the Impacts of Human Activities on Net Primary Productivity of Wetlands in the Northeast China[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences Northeast Institute of Geography and Agroecology, 2014.]

[14] 刘雪佳, 董璐, 赵杰, 等. 我国荒漠植被生产力动态及其与水热因子的关系[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 459-466. [Liu Xuejia, Dong Lu, Zhao Jie, et al. Dynamic state of desert vegetation productivity and its relationship with water-heat factors in China[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 459-466.]

[15] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于SPEI和TVDI的河南省干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 126-132. [Chen Shaodan, Zhang Liping, Tang Rouxin, et al. Analysis on temporal and spatial variation of drought in Henan Province based on SPEI and TVDI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 126-132.]

[16] 胡安焱, 郭生练, 刘燕, 等. 干旱区内陆河流域生态环境质量模糊综合评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(2): 69-73. [Hu Anyan, Guo Shenglian, Liu Yan, et al. Ecologic environment quality fuzzy comprehensive evaluation in the inland river basin[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, 17(2): 69-73.]

[17] 薛英, 王让会, 张慧芝, 等. 塔里木河干流生态风险评价[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 562-567. [Xue Ying, Wang Ranghui, Zhang Huizhi, et al. Ecological risk assessment of the main stream of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 562-567.]

[18] 黄麟, 曹巍, 巩国丽, 等. 2000—2010年中国三北地区生态系统时空变化特征[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 107-117. [Huang Lin, Cao Wei, Gong Guoli, et al. Spatial and temporal variations in ecosystems in the three northern regions of China, 2000-2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 107-117.]

[19] Li Z, Liu X, Niu T, et al. Ecological restoration and its effects on a regional climate: The source region of the Yellow River, China[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(10): 5897-5904.

[20] 贺添, 邵全琴. 基于MOD16产品的我国2001—2010年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988. [He Tian, Shao Quanqin. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products[J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(6): 979-988.]

[21] 李梦怡, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 39-47. [Li Mengyi, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Evaluation of ecological water security and analysis of driving factors in the lower Tarim River, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 39-47.]

[22] 刘一哲, 冯文兰, 扎西央宗, 等. 基于MODIS TVDI和模糊数学方法的藏北地区旱情等级遥感监测[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 86-96. [Liu Yizhe, Feng Wenlan, Zhaxi Yangzong, et al. Remote sensing monitoring of drought level in north Tibet based on MODIS TVDI and fuzzy mathematics[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 86-96.]

[23] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2418-2426. [Fu Aihong, Cheng Yaning, Li Weihong. Assessment on ecosystem health in the Tarim River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2418-2426.]

[24] 彭月, 李昌晓, 李健. 2000—2012年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2480-2490. [Peng Yue, Li Changxiao, Li Jian. Assessment on the ecological security of the Yellow River Basin in Ningxia Province from 2000 to 2012[J]. Resources Science, 2015, 37(12): 2480-2490.]

[25] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近50 a干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677-688. [Zhou Dan, Zhang Bo, Ren Peigui, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 677-688.]

[26] 王月健, 徐海量, 杨广. 塔里木河中游地区水土资源生态安全评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(11): 111-117. [Wang Yuejian, Xu Hailiang, Yang Guang. Evaluation of ecological security of water and soil resources in the middle reaches of the Tarim River[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33 (11): 111-117.]

[27] 李军媛, 徐维新, 程志刚, 等. 1982—2006年中国半干旱、干旱区气候与植被覆盖的时空变化[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 268-272. [Li Junyuan, Xu Weixin, Cheng Zhigang, et al. Spatial-temporal changes of climate and vegetation cover in the semi-arid and arid regions of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(2): 268-272.]

[28] 任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 1-19. [Ren Guoyu, Yuan Yujiang, Liu Yanju, et al. Changes in precipitation over Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 1-19.]

[29] 李卫红, 吾买尔江·吾布力, 马玉其, 等. 基于河-湖-库水系连通的孔雀河生态输水分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 130-135. [Li Weihong, Wumairjiang Wubuli, Ma Yuqi, et al. Ecological water conveyance project based on river-lake-reservoir connected system in the Kongque River[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(1): 130-135.]

[30] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 塔里木河下游断流河道输水的生态响应与生态修复[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 521-530. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Ecological response and ecological regeneration of transfusing stream water along the dried-up watercourse in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(4): 521-530.]

Ecological security assessment and ecological restoration countermeasures in the dry-up area of the lower Tarim River

KONG Zijie[1,2], DENG Mingjiang[3], LING Hongbo[4], WANG Guangyan[5], XU Shengwu[5], WANG Zengru[6]

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Xinjiang Irtysh River Basin Development and Construction Management Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 5. Management Bureau of the Main Stream of Xinjiang Tarim River Basin, Korla 841000, Xinjiang, China; 6. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Harnessing the ecological environment of the cutoff river in the lower reaches of Tarim River is of great significance for maintaining the overall ecological security of the downstream Tarim River and consolidating the achievements of ecological water conveyance in the past 20 years. The lower reaches of Tarim River have been involved in ecological water conveyance since 2000, and now remarkable achievements have been made. However, ecological degradation in some areas of the lower Tarim River Basin is severe, and its branches, the Karanqi River and Nashen River, are still fragmented. Remote sensing images and meteorological and hydrological data of the river cutoff area combined with GIS technology and Mann-Kendall nonparametric test method were used to analyze the temporal and spatial variation laws of ecological environment elements, to evaluate the ecological security situation, and to propose countermeasures for ecological restoration. The results show that in terms of meteorological elements, the number of sandstorm days increased under the condition of extremely significant reduction of gale days from 1971 to 2019, the temperature and precipitation showed an upward trend from 1957 to 2019, and the temperature-vegetation drought index increased greatly from 2000 to 2018. In terms of the variation law of vegetation factors, although the vegetation coverage and productivity showed no significant increasing trend from 2000 to 2018, their levels were very low. Furthermore, the ecological security of the cutoff river area is in the early and moderate warning levels.

Keywords: lower Tarim River; river cut-off area; ecological safety; ecological restoration; water system connection